

## ÉTUDE DES CHANGEMENTS DE CIRCULATION AU-DESSUS DE L'OCÉAN AUSTRAL EN ÉTÉ

BELLEFLAMME A., FETTWEIS X., ERPICUM M.

Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie, Université de Liège, Allée du 6-août, 2, 4000 Liège, Belgique  
[A.Belleflamme@ulg.ac.be ; Xavier.Fettweis@ulg.ac.be ; Michel.Erpicum@ulg.ac.be]

**Résumé** – Au cours des cinq dernières décennies, les réanalyses (ERA et NCEP/NCAR) montrent un renforcement du gradient de pression entre la ceinture anticyclonique subtropicale australe et les dépressions circumpolaires australes en été. À l'aide d'une classification automatique de types de circulations atmosphériques, nous montrons que ce renforcement du gradient de pression est généralisé à tous les types de circulations et que, paradoxalement, il n'engendre pas de changements de circulation au sens strict. Il n'est probablement que la conséquence du renforcement du gradient de température entre les tropiques et le pôle Sud, sans conséquence sur la circulation générale. Notre classification nous permet aussi de comparer avec succès les deux réanalyses dans une région où les données d'observations sont rares.

**Mots-clés** : circulation atmosphérique, gradient de pression, réanalyses, classification de types de circulations, océan Austral.

**Abstract** – *Study of the circulation changes over the Southern Ocean during summer.* Over the five last decades, the reanalyses (ERA and NCEP/NCAR) show a strengthening of the pressure gradient between the southern hemisphere subtropical anticyclone belt and the southern circumpolar lows during summer. With the help of an automatic circulation type classification, we show that the strengthening of the pressure gradient is generalised to all circulation types and, paradoxically, it does not cause circulation changes. It is probably implied by the strengthening of the temperature gradient between the tropics and the South Pole, without consequences on the general circulation. Our classification also allows a successful comparison between the two reanalyses in a region where the observation data are rare.

**Keywords**: atmospheric circulation, pressure gradient, reanalyses, circulation type classification, Southern Ocean.

### Introduction

Dans son dernier rapport (AR5), le GIEC indique que la pression atmosphérique réduite au niveau de la mer a significativement augmenté dans la ceinture anticyclonique subtropicale australe toutes saisons confondues et qu'elle a diminué au-dessus du continent antarctique durant l'été austral au cours des trois dernières décennies (Hartmann *et al.*, 2013), entraînant une expansion vers le sud de la cellule de Hadley et une tendance positive du Mode Annulaire Austral (Bindoff *et al.*, 2013). La cause de ces changements de pression est probablement une combinaison de l'augmentation de l'effet de serre et de l'amincissement de la couche d'ozone dans la région (Choi *et al.*, 2014). Toutefois, de nombreuses incertitudes subsistent encore quant à l'influence de ces facteurs et à la magnitude des changements qu'ils ont entraînés (Bindoff *et al.*, 2013). D'ailleurs, le GIEC ne rapporte pas de tendance claire à propos d'un éventuel changement de position ou d'intensité du front polaire antarctique, contrairement au front polaire arctique qui s'est déplacé vers le nord au cours des dernières décennies. Il est donc intéressant d'étudier plus en détail les champs de pression au-dessus de l'océan Austral afin de détecter d'éventuels changements dans la circulation générale.

La circulation générale au-dessus de l'océan Austral est caractérisée par un gradient de pression élevé entre 45°S et 60°S qui marque la transition entre les dépressions circumpolaires antarctiques et la ceinture anticyclonique subtropicale australe. Ce gradient de pression engendre une circulation d'ouest intense vu qu'elle ne rencontre aucun obstacle continental. Ce sont les célèbres quarantièmes rugissants et cinquantièmes hurlants, nommés ainsi pour la vigueur des perturbations rencontrées par les navigateurs à ces latitudes.

Pour étudier la circulation atmosphérique dans cette région, nous utilisons une classification de types de circulations atmosphériques en nous basant sur les réanalyses i) ERA de l'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) et ii) NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research). Cependant, comme l'ont montré Brands *et al.* (2012) sur base de la hauteur géopotentielle, ces deux réanalyses présentent des champs de circulation moins

concordants, particulièrement au-dessus du continent antarctique mais également au-dessus de l'océan Austral, par rapport à d'autres régions du globe. Ainsi, nous profitons aussi des résultats de cette classification pour comparer les deux réanalyses entre elles afin de préciser la nature de ces différences.

## 1. Données

Nous analysons la circulation atmosphérique sur base des moyennes journalières de la pression réduite au niveau de la mer des ERA (ERA-40 de 1959 à 1978 et ERA-Interim de 1979 à 2012) et des NCEP/NCAR lors des étés austraux (décembre, janvier et février - DJF) de 1959/1960 à 2011/2012. Nous nous limitons à l'été austral car les changements de pression listés par le GIEC sont les plus significatifs lors de cette saison (Hartmann *et al.*, 2013). Les températures journalières à 2 m sur la même période sont traitées *a posteriori*. Les données sont interpolées linéairement sur une grille régulière (à une résolution spatiale de 250 km) de 11 250 km de côté et centrée sur le pôle Sud. D'une part, ceci permet de pallier la différence de résolution spatiale entre les réanalyses (1° pour ERA et 2,5° pour NCEP/NCAR) afin de rendre la comparaison plus aisée. D'autre part, l'utilisation d'une grille latitude-longitude introduirait une distorsion dans les résultats vu que tous les pixels ont le même poids alors que leurs superficies diffèrent à cause de la convergence des méridiens vers le pôle.

## 2. Méthode

Les circulations générales simulées par les deux réanalyses sont comparées entre elles à l'aide d'une classification automatique de types de circulations atmosphériques. L'intérêt des classifications de types de circulations est de permettre une comparaison sur base de données journalières en regroupant les situations similaires au sein d'une même classe de circulations homogènes (Philipp *et al.*, 2010). Ici, nous utilisons la méthode de classification élaborée par Fettweis *et al.* (2011). Cette classification a été appliquée au Groenland par Belleflamme *et al.* (2013) et Fettweis *et al.* (2013) et en Europe par Belleflamme *et al.* (2014). La similitude entre deux situations de circulation journalières est mesurée par le coefficient de corrélation de Spearman (Vautard et Yiou, 2009) où, pour chaque situation, la valeur de la pression de chaque pixel est remplacée par son rang par rapport aux autres pixels de la même situation. L'avantage des indices de similitude basés sur la corrélation est qu'ils ne sont pas influencés par la pression moyenne des situations. Ils prennent uniquement en compte la localisation des principaux centres d'action barométriques (Philipp *et al.*, 2007). Par ailleurs, la corrélation des rangs de Spearman est moins influencée par les valeurs extrêmes ou aberrantes, ce qui est un avantage dans la région étudiée, où la fiabilité des réanalyses est limitée par le manque d'observations (Brands *et al.*, 2012).

Notre classification étant automatique, les types de circulations sont créés par l'algorithme. Ils ne sont pas prédéfinis par l'utilisateur. Dès lors, les types de circulations de deux jeux de données différents seront eux-mêmes différents et donc difficilement comparables. Nous appliquons ici une solution proposée par Huth (2000) qui consiste à imposer (*projeter*) les paramètres définissant les types de circulations d'un jeu de données de référence à l'autre jeu de données. Les classes sont donc définies de manière identique d'un jeu de données à l'autre et leur comparaison peut se faire directement sur base des différences de leurs fréquences d'apparition et d'autres caractéristiques comme par exemple la pression moyenne de chaque classe.

Sachant que le but de cette étude est d'analyser les changements de circulation atmosphérique et de gradient de pression entre la ceinture anticyclonique subtropicale australe et le continent antarctique, seuls les pixels océaniques en deçà de 45°S sont pris en compte dans la classification. Ainsi, nous évitons l'influence de la ceinture anticyclonique

subtropicale, dont la variabilité de pression est quasi nulle. Par ailleurs, la pression réduite au niveau de la mer au-dessus de la calotte glaciaire est entachée d'une grande incertitude car elle est fortement dépendante de la température de surface (Brands *et al.*, 2012). Dans cette étude, lorsque nous parlons d'océan Austral, nous nous limitons au domaine décrit ci-dessus.

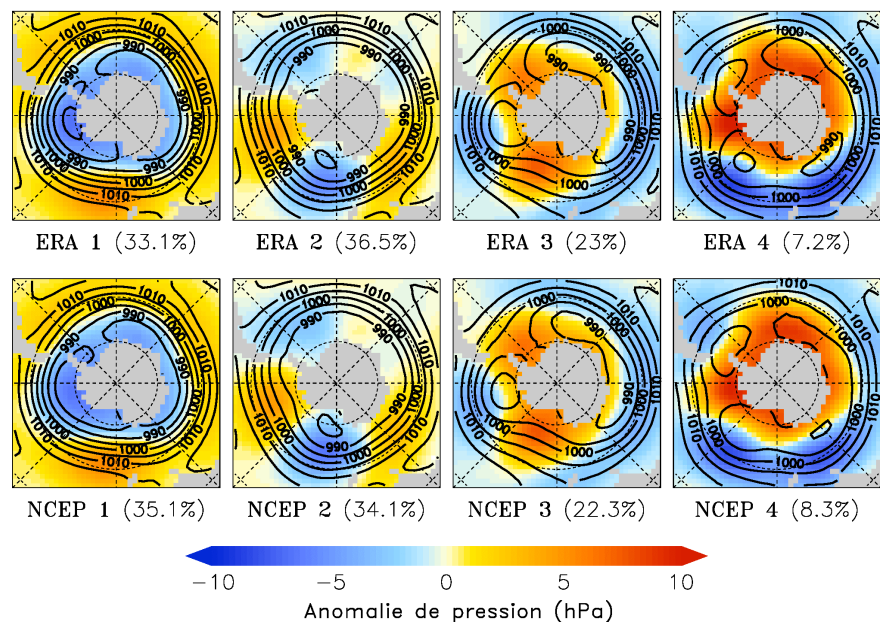
Le nombre de types de circulations est fixé ici à quatre. Ainsi, les types de circulations obtenus sont bien distincts les uns des autres sachant que l'augmentation du nombre de classes n'aboutit qu'au fractionnement de certains types existants en sous-ensembles moins différenciés. Ceci peut d'ailleurs créer des disparités non justifiées entre les réanalyses vu que de faibles différences peuvent favoriser un type plutôt qu'un autre s'ils ne sont pas bien différenciés. Notons que les situations qui n'ont pas pu être attribuées à un des types de circulations, parce qu'elles en sont trop différentes, sont ajoutées à la dernière classe (type 4).

Enfin, le gradient de pression d'un pixel donné est estimé par la moyenne des valeurs absolues des écarts entre ce pixel et ses huit voisins directs. Il s'agit donc de la magnitude du gradient et non pas du gradient en tant que vecteur.

### 3. Résultats

Dans cette étude, nous nous focalisons sur les résultats obtenus en utilisant les réanalyses ERA comme référence pour la classification et en projetant les classes ainsi obtenues sur les données de NCEP/NCAR, sachant qu'utiliser les NCEP/NCAR comme référence aboutit aux mêmes conclusions (non montré ici).

Les quatre types de circulations présentent un gradient de pression prononcé entre la ceinture anticyclonique subtropicale et les dépressions circum-polaires (Fig. 1). Toutefois, ce gradient diminue du premier au quatrième type. Par ailleurs, les types 1 et 3 sont caractérisés par une dépression sur la mer d'Amundsen, à l'ouest de la péninsule antarctique, alors que cette dépression est située sur la mer de Ross pour les types 2 et 4.

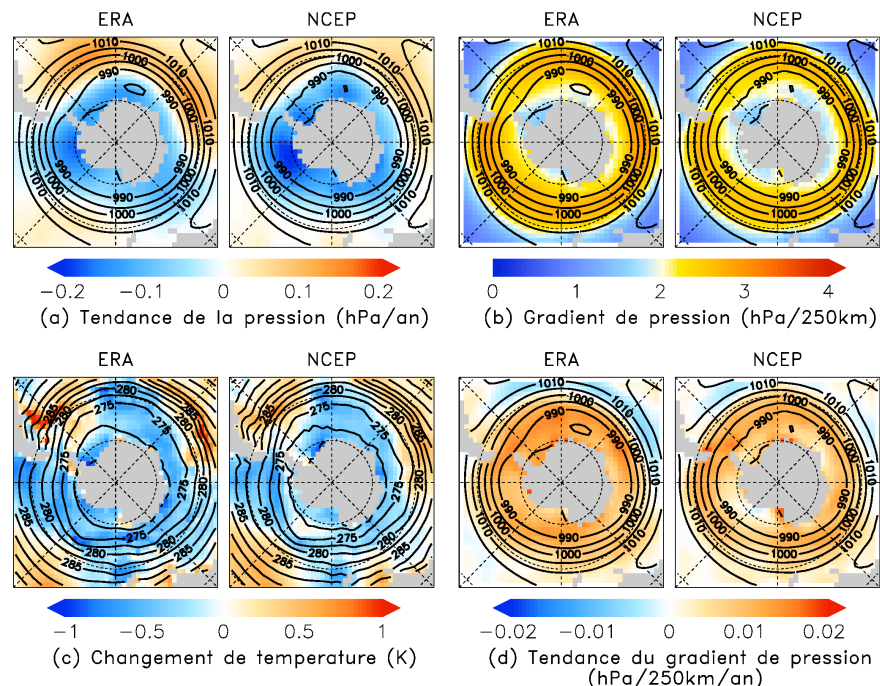


**Figure 1 :** Types de circulations obtenus sur base des réanalyses ERA (haut) et par projection des réanalyses NCEP/NCAR (bas) sur la période 1959/1960-2011/2012 (DJF). Les courbes représentent les isobares de la pression réduite au niveau de la mer moyennée sur tous les jours de chaque classe (en hPa). La couleur de fond indique l'anomalie de pression de chaque classe par rapport à la moyenne saisonnière. La fréquence de chaque classe est indiquée entre parenthèses. Les cercles pointillés représentent les 30°, 50° et 70° parallèles sud. Les droites pointillées représentent les méridiens tous les 45°, celui de Greenwich étant le segment vertical entre le pôle Sud et le bord supérieur du champ cartographié

### 3.1. Comparaison entre les réanalyses

Il n'y a pas d'anomalie significative entre les deux réanalyses qui, en moyenne, sont très semblables. En revanche, les champs de pression réduite au niveau de la mer sont plus différenciés entre les basses et les hautes pressions pour les réanalyses ERA (Fig. 1). Ce lissage des champs de pression dans NCEP/NCAR est probablement dû à leur résolution spatiale plus grossière (2,5° contre ~1° pour ERA), ce qui aboutit à une atténuation des valeurs extrêmes. Les changements de pression et de température simulés par les deux réanalyses correspondent bien, bien que les données ERA ne soient pas homogènes car construites à l'aide des réanalyses ERA-40 (1959-1978) et ERA-Interim (1979-2012) (Fig. 2). La différence de résolution entre les deux réanalyses semble peu affecter les tendances.

Les changements de fréquences montrent de petites différences entre ERA et NCEP/NCAR (Fig. 3). Ces différences se résument globalement à une surestimation de la fréquence du type 1 et à une sous-estimation de celle du type 2 dans NCEP/NCAR par rapport à ERA. Les types 3 et 4 ne sont pas affectés. Il est enfin intéressant de constater qu'il n'y a pas de cassure dans les séries temporelles des ERA lors de la transition entre ERA-40 et ERA-Interim en 1979.



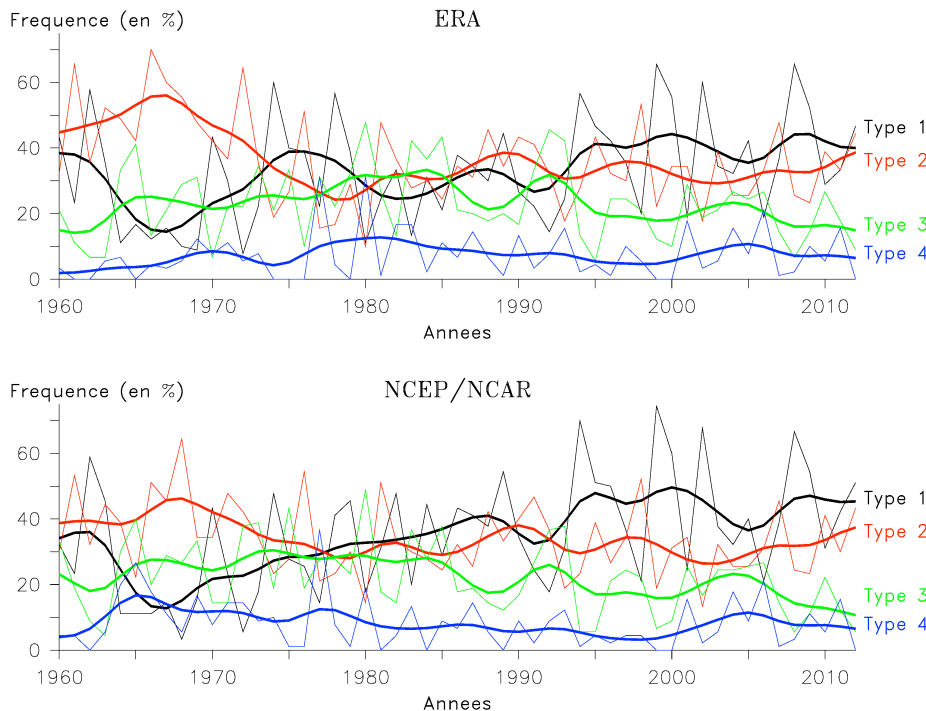
**Figure 2 :** (a) la tendance de la pression réduite au niveau de la mer est définie comme étant la pente de la droite de régression sur les moyennes saisonnières (DJF) de 1959/1960 à 2011/2012. Les courbes noires représentent les isobares moyennes sur la période étudiée (en hPa) ; (b) le gradient de pression est calculé sur l'ensemble des mois d'été austral sur la même période ; (c) le changement de température est défini comme la différence entre la température estivale moyenne de 1999/2000-2011/2012 et celle de 1960/1961-1989/1990. Les courbes noires représentent les isothermes moyennes sur la période étudiée (en K) ; (d) idem que (a) mais pour le gradient de pression

### 3.2. Changements dans la circulation générale

Le renforcement du gradient de pression (Fig. 2 d) conséquent à l'augmentation de la pression de la bordure sud de la ceinture anticyclonique subtropicale australe et au creusement des dépressions circumpolaires (Fig. 2 a) n'engendre pas de changements de circulation au sens strict, c'est-à-dire une modification de la localisation des principaux centres d'action barométriques.

D'abord, les changements de fréquence des types 1 à 4 montrent une augmentation de la fréquence du type 1 (Fig. 3), qui est caractérisé par le gradient de pression le plus important. Néanmoins, cette augmentation de la fréquence du type 1 se fait essentiellement au détriment du type 3 dont la localisation des centres d'action barométriques est similaire à celle du type 1, mais dont le gradient de pression est moins marqué. Les fréquences des types 2 et 4 n'affichent aucune tendance. Cela signifie en particulier qu'il n'y a pas, au cours des dernières

années, d'apparition de nouveaux types de circulations clairement différents de ceux identifiés par la méthode de classification car la fréquence du type 4 (regroupant les situations non classées) n'évolue pas.



**Figure 3 :** Fréquence relative saisonnière de chaque type de circulation de référence ERA et de chaque type NCEP/NCAR après projection des types ERA. Le trait épais représente la moyenne glissante sur dix ans. Les fréquences d'une année donnée reprennent les mois de janvier et de février de cette année et le mois de décembre de l'année précédente

Ensuite, le renforcement du gradient est similaire pour tous les types de circulations et aucun autre changement majeur n'est observé au sein des types. Il n'y a donc ni différenciation des changements de pression observés en fonction des types de circulations, ni modification des caractéristiques principales d'un type donné au cours de la période étudiée, excepté le renforcement du gradient de pression. Il semble donc que ce renforcement du gradient de pression soit lié aux changements de température qui, comme la pression, diminue à proximité du continent antarctique et augmente au bord de la ceinture anticyclonique subtropicale (Fig. 2 c). Ainsi, le gradient de température se renforce également sans aucune conséquence sur la circulation atmosphérique. Toutefois, les changements de température sont très faibles et irréguliers au cours de la période étudiée, mais n'oublions pas que nous utilisons uniquement les pixels océaniques.

## Conclusion

Nous avons étudié la circulation atmosphérique dans les basses couches de la troposphère lors de l'été austral (décembre, janvier, février) des dernières décennies (1959/1960-2011/2012) au moyen de la pression réduite au niveau de la mer des réanalyses ERA (ERA-40 et ERA-Interim) et NCEP/NCAR au-dessus de l'océan Austral. Afin d'analyser, d'une part les différences entre les deux réanalyses, et d'autre part les éventuels changements de circulation, nous avons employé une classification de types de circulations.

Les différences entre les deux réanalyses résultent principalement de leurs résolutions spatiales différentes. Les réanalyses montrent le même renforcement récent du gradient de pression entre les tropiques et le pôle Sud, bien que les données ERA ne soient pas homogènes.

Le renforcement du gradient de pression au-dessus de l'océan Austral n'est pas associé à un changement de la localisation des centres d'action barométriques car nous n'observons pas de changements des types de circulations. Ce renforcement du gradient de pression est

d'origine thermique, sachant qu'il est similaire pour tous les types de circulations. La conséquence de ce renforcement du gradient est une intensification de la circulation d'ouest circumpolaire, ce qui isole encore un peu plus le continent antarctique au niveau de la circulation atmosphérique générale.

## Références bibliographiques

- Belleflamme A., Fettweis X., Lang C., Erpicum M., 2013: Current and future atmospheric circulation at 500 hPa over Greenland simulated by the CMIP3 and CMIP5 global models. *Climate Dynamics*, **41**, 2061-2080, doi: 10.1007/s00382-012-1538-2.
- Belleflamme A., Fettweis X., Erpicum M., 2014: Do global warming-induced circulation pattern changes affect temperature and precipitation over Europe during summer? *International Journal of Climatology*, accepted.
- Bindoff N., Stott P., AchutaRao K., Allen M., Gillett N., Gutzler D., Hansingo K., Hegerl G., Hu Y., Jain S., Mokhov I., Overland J., Perlwitz J., Sebbari R., Zhang X., 2013: Detection and attribution of climate change: from global to regional. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker T., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 867-952.
- Brands S., Gutiérrez J., Herrera S., Cofiño A., 2012: On the use of reanalysis data for downscaling. *Journal of Climate*, **25**, 2 517-2 526, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00251.1.
- Choi J., Son S.-W., Lu J., Min S.-K., 2014: Further observational evidence of Hadley cell widening in the Southern Hemisphere. *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1002/2014GL059426.
- Fettweis X., Mabilhe G., Erpicum M., Nicolay S., Van den Broeke M., 2011: The 1958-2009 Greenland ice sheet surface melt and the mid-tropospheric atmospheric circulation. *Climate Dynamics*, **36**, 139-159, doi: 10.1007/s00382-010-0772-8.
- Fettweis X., Hanna E., Lang C., Belleflamme A., Erpicum M., Gallée H., 2013: Brief communication "Important role of the mid-tropospheric atmospheric circulation in the recent surface melt increase over the Greenland ice sheet". *The Cryosphere*, **7**, 241-248, doi: 10.5194/tc-7-241-2013.
- Hartmann D., Klein Tank A., Rusticucci M., Alexander L., Brönnimann S., Charabi Y., Dentener F., Dlugokencky E., Easterling D., Kaplan A., Soden B., Thorne P., Wild M., Zhai P., 2013: Observations: Atmosphere and Surface. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker T., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 159-254.
- Huth R., 2000: A circulation classification scheme applicable in GCM studies. *Theoretical and Applied Climatology*, **67**, 1-18, doi: 10.1007/s007040070012.
- Philipp A., Della-Marta P., Jacobeit J., Fereday D., Jones P., Moberg A., Wanner H., 2007: Long-term variability of daily North Atlantic-European pressure patterns since 1850 classified by simulated annealing clustering. *Journal of Climate*, **20**, 4065-4095, doi: 10.1175/JCLI4175.1.
- Philipp A., Bartholy J., Beck C., Erpicum M., Esteban P., Fettweis X., Huth R., James P., Jourdain S., Kreienkamp F., Krennert T., Lykoudis S., Michalides S., Pianko K., Post P., Rassilla Alvarez D., Schiemann R., Spekat A., Tymvios F. S., 2010: COST733CAT - a database of weather and circulation type classifications. *Physics and Chemistry of the Earth*, **35(9-12)**, 360-373, doi: 10.1016/j.pce.2009.12.010.
- Vautard R., Yiou P., 2009: Control of recent European surface climate change by atmospheric flow. *Geophysical Research Letters*, **36**, L22702, doi: 10.1029/2009GL040480.